

# 基于近红外相机成像和阈值分割的苹果早期损伤检测

邵志明<sup>1,2</sup> 王怀彬<sup>1,2</sup> 董志城<sup>1,2</sup> 原育慧<sup>1,2</sup> 李军会<sup>1,2</sup> 赵龙莲<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;  
2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了解决苹果表面早期损伤难以检测的问题,提出了一种基于近红外相机成像技术和图像阈值分割方法的苹果表面早期损伤检测方法。使用 T2SL 近红外相机采集苹果样本近红外图像,通过最大类间方差法对近红外图像进行背景分割,基于图像的灰度直方图进行无损和有损区域分割阈值的设定,并结合形态学处理提取苹果样本的损伤区域。该方法对无表面损伤苹果样本的判别准确率是 88%,对即时损伤后样本的判别准确率是 90%,对损伤后 30 min 样本的判别准确率达到 96%。基于近红外相机成像和阈值分割的苹果早期损伤检测不需要建模学习,类似一种无监督判别分析方法,研究结果表明,利用该方法进行苹果表面早期损伤检测是可行的。

**关键词:** 苹果; 近红外相机成像; 阈值分割; 早期损伤

**中图分类号:** S436.611; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0134-06

## Early Bruises Detection Method of Apple Surface Based on Near Infrared Camera Imaging Technology and Image Threshold Segmentation Method

SHAO Zhiming<sup>1,2</sup> WANG Huaibin<sup>1,2</sup> DONG Zhicheng<sup>1,2</sup> YUAN Yuhui<sup>1,2</sup> LI Junhui<sup>1,2</sup> ZHAO Longlian<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China  
2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that it is difficult to detect the early bruises of apple surface, an early bruises detection method of apple surface based on near infrared camera imaging technology and image threshold segmentation method was proposed. The near infrared image of apple samples was collected by T2SL near infrared camera, which had absolute advantages in the near infrared band imaging compared with other types of camera. The background of the near infrared image was segmented by Otsu method. The threshold of sound and bruise region segmentation was set based on the gray histogram of the image, and the bruise region of apple samples was extracted by morphological processing. The accuracy of the method was 88% for the sound samples, 90% for the samples after bruise, and 96% for the samples after 30 minutes of bruise. The early bruises detection of apple surface based on near infrared camera imaging and threshold segmentation did not need modeling learning, which was similar to an unsupervised discriminant analysis method. The results showed that the method was feasible for early bruises detection of apple surface, it can not only detect the early bruises of apple surface, but also can directly outline the location of the surface bruises, which can provide a fast and efficient method for real-time online detection of apple surface bruises.

**Key words:** apple; near infrared camera imaging; threshold segmentation; early bruises

### 0 引言

苹果在采摘、包装和运输等操作中极易发生碰

撞和挤压导致表面的损伤,但是苹果表面的早期损伤通常没有外部症状或看起来与周围的健康组织相似。随着损伤时间的积累,苹果损伤组织会产生一

收稿日期: 2021-07-01 修回日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31772064)

作者简介: 邵志明(1996—),男,硕士生,主要从事生物系统感测与智能装备研究,E-mail: shaozhiming@cau.edu.cn

通信作者: 赵龙莲(1972—),女,副教授,主要从事生物系统感测与智能装备研究,E-mail: zhaolonglian@aliyun.com

系列生理变化并影响到其他健康无损的苹果<sup>[1]</sup>。传统的鉴别苹果表面损伤的方法一般是人工肉眼鉴别或应用机器视觉技术等<sup>[2-4]</sup>,但这些方法都无法在损伤初期的短时间内进行判别,而且人工判别方法费时费力,还易造成苹果的二次损伤,影响苹果品质。因此急需提出一种快速、准确、高效、便捷的苹果无损检测技术,能够对苹果表面的损伤,特别是表面的早期损伤进行检测。

苹果表面组织在早期损伤后,果肉组织遭到破坏,损伤部位的生理代谢出现紊乱,其果肉内的水分和可溶性固形物等含量发生变化<sup>[5-6]</sup>。随着损伤时间的增加和氧气的大量进入,受损伤部位果肉组织原本的氧化还原动态平衡被打破,使之向醌类物质方向移动,导致醌类物质大量积累,从而使苹果组织呈现较深的颜色,即发生褐变<sup>[7-8]</sup>。近红外光对待测样本中的水分、可溶性固形物等有机组分含量的变化非常敏感,且近红外光在样本组织中的穿透性大于可见光,因此苹果健康组织和损伤组织对近红外光的吸收不同,通过近红外成像技术就可以观察到苹果表面的损伤。

近年来,有国内外学者应用近红外高光谱成像技术检测水果的表面早期损伤,XING等<sup>[9]</sup>利用高光谱技术结合图像处理方法检测“乔纳金”苹果的表面损伤,无损苹果的分类准确率为84.6%,1 d内的损伤判别准确率为77.5%。LUO等<sup>[10]</sup>提出了一种基于近红外高光谱/多光谱成像结合分水岭算法的不同果皮颜色苹果的早期损伤检测方法,对210个样本的总体检测准确率达到99.5%。沈宇等<sup>[11]</sup>通过两次连续投影法消除高光谱数据冗余,通过固定阈值分割和形态学处理提取损伤区域,对40个无损和轻微损伤的苹果样本的判别准确率为94.4%。上述研究为基于近红外成像和阈值分割的检测技术提供了理论依据,但是,高光谱成像技术存在不易实现在线分析、成本较高等问题。

为了实现苹果表面早期损伤的快速无损检测,本文提出一种基于近红外相机成像和阈值分割的检测方法,先使用近红外相机成像技术采集苹果表面早期损伤图像,然后对苹果图像进行分割和损伤提取。

## 1 苹果样本近红外图像采集

### 1.1 样本及预处理

由于红富士苹果的果皮颜色较深且存在变化,对图像数据的采集存在影响,所以红富士苹果的表面损伤检测比其它果皮颜色单一的苹果难度大,也更具有代表性,因此本研究使用红富士苹果作为实

验对象。实验选用大小基本一致同一批次的烟台栖霞红富士苹果30个,因为红富士苹果具有果皮颜色不均匀的特点,每个苹果选取两个面采集图像,共计60个样本,同一苹果样本两个不同面的差别甚至大于不同的苹果样本,因此60个样本相对独立。为了避免果皮表面灰尘等杂质以及表面温度变化对实验结果的影响,首先将苹果在室内放置12 h,实验前再用75%的酒精对其表面进行消毒去污。

表面早期轻微损伤的苹果与无表面损伤苹果肉眼观察时没有区别,因此表面早期损伤苹果样本需要人为造成苹果表面的轻微损伤后再进行检测。损伤装置如图1所示,使用一直径为1.8 cm、质量为85 g、杆长50 cm的小锤,将其抬升到与水平方向夹角45°时自由下落,使摆臂做近似单摆运动,经计算,该装置对苹果赤道部位造成的撞击冲量约为0.14 N·s,能造成苹果表面的轻微损伤,损伤面积约为0.8 cm<sup>2</sup>,损伤处表皮无破损,有轻微凹陷,肉眼无法察觉<sup>[12]</sup>。



图1 苹果外部损伤装置

Fig.1 Apple external bruise device

### 1.2 近红外相机成像系统

实验用近红外相机作为成像设备,采用比利时Xeneth公司的T2SL近红外制冷相机,是第3代红外焦平面阵列(FPA)的新型近红外相机,使用InAs/GaSb II型超晶格(T2SL)材料作为探测器材料,可在热电冷却达到200 K的温度下运行<sup>[13-14]</sup>,在1.1~1.6 μm处可以实现超过50%的量子效率<sup>[15]</sup>,像素可操作性大于99%<sup>[16]</sup>。与传统材料的近红外相机相比,采用T2SL近红外相机的图像稳定性更高<sup>[17]</sup>,噪声更低<sup>[18]</sup>,可直接通过增长曝光时间与调节增益的方式提高响应度,从而使其灵敏度更高,T2SL近红外相机在环境适应性、分辨材料特征等方面的表现更加优异,在近红外波段范围内相比于其他类型探测器检测效果更好。基于以上特点,本文应用其进行苹果表面损伤的检测。

搭建的近红外相机成像系统如图2所示。将待

测苹果样本放于背景板上,近红外相机安装在三脚架上,镜头位于苹果样品正上方 15 cm 处,使拍摄的苹果样品位于画面中心。在实验室环境中,需要增加近红外光源补充照明,将红外灯泡安装于可调节支架上,放于距离相机 20 cm 处,灯头正对苹果,与相机呈 45°照射苹果,为了使照射的光线更加均匀柔和,将灯头罩上一层柔光布。

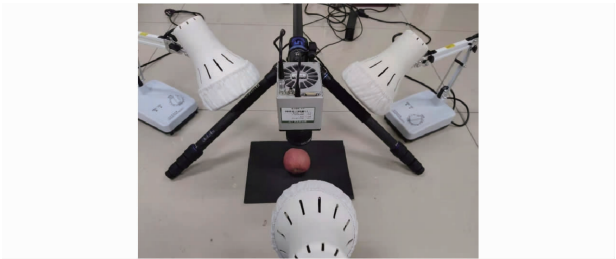


图 2 近红外相机成像系统

Fig. 2 Near infrared camera imaging system

1.3 苹果样本近红外图像采集与比较

在使用搭建好的成像系统拍摄苹果样本的近红外图像前,需要确定光线能够均匀照射到苹果样本所在的位置,并进行采集系统校正包和相机光圈的调节,使苹果样本表面光线分布均匀,近红外图像显示清晰。相机和光源调整完成后,进行图像采集。先采集无表面损伤苹果的近红外图像,然后造成损伤后立即采集表面损伤苹果的即时损伤图像,30 min 后再次采集表面损伤苹果的近红外图像,分别得到无损苹果近红外图像 60 幅、有损苹果即时损伤近红外图像 60 幅、有损苹果损伤 30 min 后近红外图像 60 幅。

近红外相机在苹果早期损伤检测方面有着优越的性能,可以将表面损伤同步显示在图像信息上,而通常此时的损伤基于可见光成像无法准确判断,如图 3 所示,图 3a 是由手机拍摄的表面损伤苹果样本可见光图像,即时损伤位置人眼无法分辨,30 min 时损伤区域出现轻度褐变,图 3b 是由近红外相机拍摄的表面损伤苹果样本近红外图像,苹果表面损伤的位置在图中清晰可见。

2 图像预处理

2.1 背景分割

自动阈值设定一直是灰度图像分割的常用方法,它的基本思想是自动选择一个最优阈值来分割基于灰度直方图的样本图像。自动阈值设定技术大致分为全局和局部阈值设定。全局阈值化也称为双级阈值化,通常根据整个图像的直方图选择单个阈值,以便将图像分割到背景和前景部分。局部阈值也称为多层阈值化,利用局部信息定义多个阈值,将

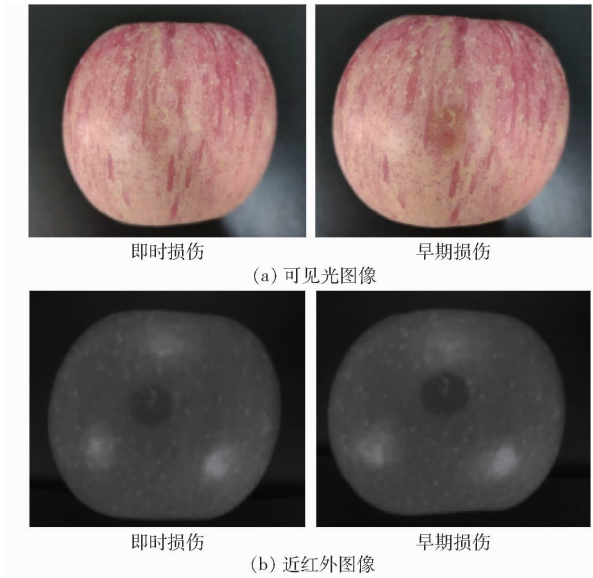


图 3 苹果损伤近红外图像与可见光图像

Fig. 3 Near infrared image and visible light image of apple bruises

图像分割为多个区域。与局部阈值处理相比,全局阈值处理简单快速,应用更广泛。

图像的阈值分割通过设定一个阈值将图像中的像素点划分为不同的两个或多个类别区域,从而提取出图像中的一个或多个目标,实现目标与背景的分[19]。用  $f(x,y)$  表示图像中坐标为  $(x,y)$  的像素灰度,阈值为  $t$ ,图像分割满足

$$g(x,y)=\begin{cases}1 & (f(x,y)\geq t) \\ 0 & (f(x,y)< t)\end{cases}$$

分割后的图像  $g(x,y)$  仅有灰度为 0 和 1 两类像素,也称为二值化图像。

对于苹果的表面损伤检测,图像分割包括背景分割和损伤区域提取。在这两种情况下,分割的图像主要由两个区域组成,即背景和果体,后者又由损伤区域和正常区域组成。对于苹果样本近红外图像的背景分割,即将图像背景和苹果果体进行分割,更适用全局阈值处理的方法。

采用 3 种最常用的阈值分割算法:Otsu 法、最小误差法、最大熵法进行图像的背景分割[20],通过对比 3 种算法的分割结果,选择一种效果最好的方法。

在进行背景分割前,还需要先采用中值滤波对苹果样本的近红外图像进行平滑降噪。滤波后的图像及分别采用 3 种方法进行背景分割的图像见图 4。

从图 4 可以看出,3 种方法进行图像背景分割,都完整地分割出了苹果果体,但是最小误差法与最大熵法分割出的图像背景区域都存在少量分割错误的像素点,Otsu 法没有出现这个问题,分割的效果最好,因此本文采用 Otsu 法进行苹果近红外图像的背景分割。

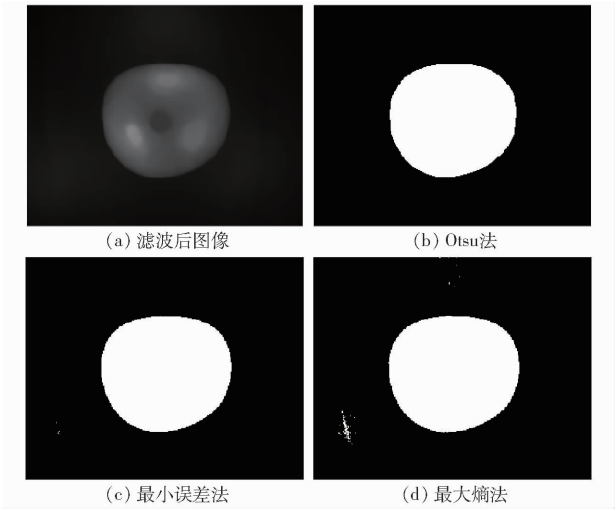


图4 苹果图像背景分割结果

Fig.4 Apple image background segmentation results

2.2 损伤区域提取

在应用 Otsu 法完成苹果近红外图像的背景分割后,将分割得到的背景掩膜图像与经过中值滤波处理去除了表面小斑点或其它微小影响的原始图像融合,即将背景区域的像素灰度全部置零,得到背景分割后的图像,见图 5a。在此基础上,进行苹果果体的损伤区域和正常区域的分割,提取出苹果的表面损伤区域。

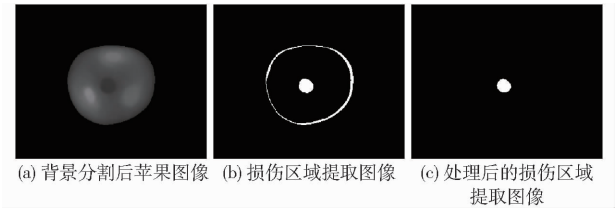


图5 苹果表面早期损伤图像处理结果

Fig.5 Image processing result of early bruises on apple surface

由图 5a 可以看出,损伤区域的灰度小于苹果果体的正常区域,因此通过设定阈值,应用阈值分割进行损伤区域提取。本文设计的损伤提取方法是一种非建模、无需学习的方法,旨在随机选取同一批次实验的苹果中的 10 个苹果样本确定其最佳阈值,阈值的选择主要依靠图像的灰度直方图进行,图 6 显示了其中一个苹果样本的背景分割后的图像灰度直方图,依据直方图的峰特征和图像损伤区域提取的效果调整阈值的设定,直到将损伤区域完整分割。取 10 个阈值的均值作为损伤提取阈值,再将该阈值应用到所有苹果的损伤提取中,最终确定的阈值为 0.21。

通过阈值分割提取出损伤区域的图像见图 5b,可以看出虽然该方法完整地提取出了苹果中心的损伤区域,但果体边缘还存在一圈被误分割为损伤的区域,该问题主要是由照明的不均匀性引起的,果体

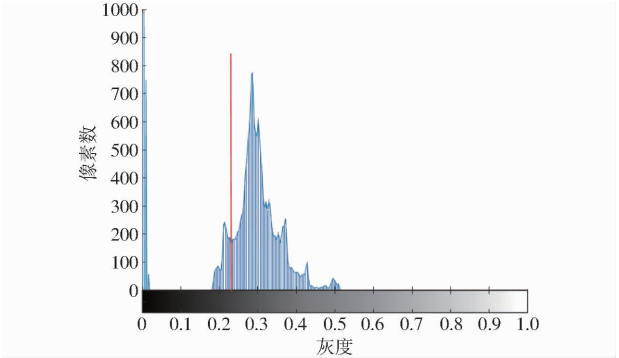


图6 背景分割后苹果近红外图像的灰度直方图

Fig.6 Gray-scale histogram of near infrared image of apple after background segmentation

边缘的灰度较低,导致阈值分割时果体边缘与损伤区域发生了混淆,为了解决这个问题,还需要对图像进行形态学开运算和滤波处理<sup>[21]</sup>。最终得到经过一系列图像处理的苹果损伤区域提取图像,见图 5c,从该图像可以看出以上方法较为清晰完整地提取出了苹果果体的损伤区域。

3 苹果损伤检测实验

以上述图像处理程序为基础进行苹果近红外图像“无损-有损”检测。如果在最后的损伤区域提取图像中不存在非零像素,认为是无损苹果,否则认定为有损苹果。但是考虑到苹果样本的差异性,并不是所有的损伤区域都被准确划分,还存在一些错误分类的像素点,因此选择对损伤区域的面积进行计算,即对损伤区域提取图像中的非零像素点进行统计,当其大于一定阈值时图像被判定为有损,反之则判定为无损。基于分类结果统计进行最优阈值的设定,根据此阈值对 150 个苹果样本图像,包括无损样本 50 个,有损样本(即时损伤)50 个,有损样本(损伤后 30 min)50 个进行分类判别,其判别准确率见表 1。

表1 苹果近红外图像分类结果

Tab.1 Classification results of apple near infrared image

| 苹果类型           | 样本数/个 | 判别为无损数/个 | 判别为有损数/个 | 判别准确率/% |
|----------------|-------|----------|----------|---------|
| 无损             | 50    | 44       | 6        | 88      |
| 有损(即时损伤)       | 50    | 5        | 45       | 90      |
| 有损(损伤后 30 min) | 50    | 2        | 48       | 96      |

根据无损苹果近红外图像、有损苹果近红外图像判别准确率来评估应用该程序检测损伤的准确性。由表 1 可以看出,该程序对无损样本的判别准确率是 88%,对有损(即时损伤)样本的判别准确率是 90%,对有损(损伤后 30 min)样本的判别准确率是 96%。造成这些误判的主要原因可能是光照的不均匀性、不稳定性,以及苹果样本的个体差异性。

为了进一步分析误判原因,将所有样本的损伤区域提取图像与背景分割二值图像融合,使图像能够较为直观地表示出苹果样本的损伤区域,并与原始图像进行对比。图 7 分别列出了几组有代表性的有损样本分类结果对比图像。

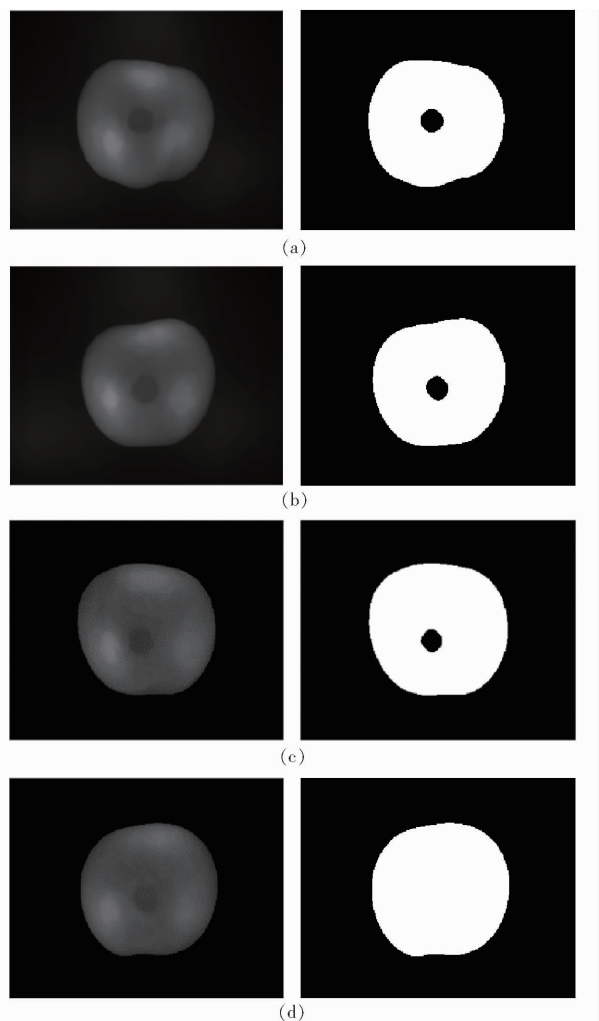


图 7 有损样本分类结果对比

Fig.7 Comparison of image classification results of bruise apple

图 7a、7b、7c 分类正确,被判定为有损,图 7d 分类错误,被判定为无损。可以看出图 7a、7b、7c 都较为准确地提取出了苹果样本的损伤区域,图 7d 则显示整个苹果果体是无损的,与原图像对比可知出现误判的原因是苹果样本表面整体的灰度相对较高,导致采用固定阈值分割时将损伤区域误分为无损区域,这是由光照的不均匀和不稳定导致的。光照不均匀导致苹果样本图像部分区域灰度偏低或偏高,不稳定则导致部分苹果样本的图像灰度整体偏低或偏高,这些问题都会使该程序检测苹果表面损伤时产生误判。通过优化补光方案,提高光照的均匀稳定性,或采用多阈值判别的损伤区域分割方法,可以提高该方法的分类判别准确率。

## 4 结论

(1)设计了一种将近红外相机成像技术与图像阈值分割方法相结合的方法,实现了苹果表面早期损伤的检测。使用 T2SL 近红外相机采集苹果样本近红外图像,通过 Otsu 法对近红外图像进行背景分割,基于图像的灰度直方图进行无损和有损区域分割阈值的设定,并结合形态学处理提取苹果样本的损伤区域。

(2)利用 50 个红富士苹果样本进行验证,该检测方法对无表面损伤苹果样本的判别准确率是 88%,对即时损伤后样本的判别准确率是 90%,对损伤 30 min 后样本的判别准确率达到 96%,说明应用该方法进行苹果表面早期损伤检测具有较好的效果。

(3)该方法不需要建模学习,类似一种无监督判别分析方法,且不仅可以检测苹果表面的早期损伤,还可以直接形象直观地指出表面损伤的位置,这为苹果表面损伤的实时在线检测提供了一种快速高效的方法。

## 参 考 文 献

- [1] 田有文,牟鑫,程怡. 高光谱成像技术无损检测水果缺陷的研究进展[J]. 农机化研究,2014,36(6):1-5.  
TIAN Youwen, MU Xin, CHENG Yi. Advancement of nondestructive detection of fruit defects based on hyperspectral imaging [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] 高辉,马国峰,刘伟杰. 基于机器视觉的苹果缺陷快速检测方法研究[J]. 食品与机械,2020,36(10):125-129,148.  
GAO Hui, MA Guofeng, LIU Weijie. Research on a rapid detection of apple defects based on mechanical vision[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 125-129,148. (in Chinese)
- [3] 孙斐. 基于机器视觉的苹果分级检测算法研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.  
SUN Fei. Research on apple grading detection algorithm based on machine vision[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [4] 黄文倩,李江波,张驰,等. 基于类球形亮度变换的水果表面缺陷提取[J]. 农业机械学报,2012,43(12):187-191.  
HUANG Wenqian, LI Jiangbo, ZHANG Chi, et al. Detection of surface defects on fruits using spherical intensity transformation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 187-191. (in Chinese)
- [5] AGAR I T, MASSANTINI R, HESS-PIERCE B, et al. Postharvest CO<sub>2</sub> and ethylene production and quality maintenance of fresh-cut kiwifruit slices[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(3): 433-440.

- [6] WATADA A E, KO N P, MINOTT D A. Factors affecting quality of fresh-cut horticultural products[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1996, 9(2): 115 – 125.
- [7] 王艳颖, 胡文忠, 庞坤, 等. 机械损伤对富士苹果生理生化变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2007(7): 58 – 62.  
WANG Yanying, HU Wenzhong, PANG Kun, et al. Effect of mechanical damage on the physiology and biochemistry in Fuji apple[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2007(7): 58 – 62. (in Chinese)
- [8] 李明. 水果品质可见/近红外光谱预测模型优化方法的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.  
LI Ming. Research of optimization modelling methods on determination of fruit quality by visible and near infrared spectroscopy [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [9] XING J, BAERDEMAEKER J D. Bruise detection on ‘Jonagold’ apples using hyperspectral imaging[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37(2): 152 – 162.
- [10] LUO W, ZHANG H, LIU X. Hyperspectral/multispectral reflectance imaging combining with watershed segmentation algorithm for detection of early bruises on apples with different peel colors[J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(5): 1218 – 1228.
- [11] 沈宇, 房胜, 郑纪业, 等. 基于高光谱成像技术的富士苹果轻微机械损伤检测研究[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(2): 144 – 150.  
SHEN Yu, FANG Sheng, ZHENG Jiye, et al. Detection of slight mechanical damage of Fuji apple fruits based on hyperspectral imaging technology[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(2): 144 – 150. (in Chinese)
- [12] 赵杰文, 刘剑华, 陈全胜, 等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(1): 106 – 109.  
ZHAO Jiewen, LIU Jianhua, CHEN Quansheng, et al. Detecting subtle bruises on fruits with hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(1): 106 – 109. (in Chinese)
- [13] MULLER R, GRAMICH V, WAURO M, et al. High operating temperature InAs/GaSb type-II superlattice detectors on GaAs substrate for the long wavelength infrared[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 96: 141 – 144.
- [14] MARTYNIUK P, MICHALEZEWSKI K, TSAI T. A thermoelectrically cooled nBn type-II superlattices InAs/InAsSb/B – AlAsSb mid-wave infrared detector[J]. *Physica Status Solidi (A)-Applications and Materials*, 2020, 217(6): 1 – 6.
- [15] GUO C, SUN Y, JIA Z, et al. Visible-extended mid-infrared wide spectrum detector based on InAs/GaSb type-II superlattices (T2SL)[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2018, 89: 147 – 153.
- [16] KLIPSTEIN P C, BENNY Y, GLIKSMAN S, et al. Minority carrier lifetime and diffusion length in type II superlattice barrier devices[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 96: 155 – 162.
- [17] HOGLUND L, ASPLUND C, WURTEMBERG R M, et al. Advantages of T2SL: results from production and new development at IRnova[C]//Proc. of SPIE 9819, 2016.
- [18] RIBET-MOHAMED I, NGHIEM J, CAES M, et al. Temporal stability and correctability of a MWIR T2SL focal plane array [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 96: 145 – 150.
- [19] 吴一全, 孟天亮, 吴诗姘. 图像阈值分割方法研究进展 20 年(1994—2014)[J]. *数据采集与处理*, 2015, 30(1): 1 – 23.  
WU Yiquan, MENG Tianliang, WU Shihua. Research progress of image thresholding methods in recent 20 years (1994—2014)[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(1): 1 – 23. (in Chinese)
- [20] LU Y, LU R. Histogram-based automatic thresholding for bruise detection of apples by structured-illumination reflectance imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 160: 30 – 41.
- [21] 耿帅. 基于数学形态学的图像去噪[D]. 济南: 山东师范大学, 2012.  
GENG Shuai. Image denoising based on mathematical morphology [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012. (in Chinese)